

70kW급 FCEV용 ZVT 부스트 컨버터의 고효율 운전을 위한 최적 제어 알고리즘 설계 방안

심승애, 장푸름, 박상민, 주동명, 노용수, 최준혁
한국전자기술연구원 전력제어시스템연구센터

Optimized Control Method for High-Efficiency Drive of 70kW ZVT Boost Converter for FCEV

Seung Ae Sim, Pooreum Jang, Sang Min Park, Dongmyoung Joo, Yong-Su Noh, Jun-Hyuk Choi
Korea Electronics Technology Institute (KETI)

ABSTRACT

본 논문은 소프트 스위칭 셀 회로를 포함한 ZVT-PRC (Zero Voltage Transition-Partial Resonant Converter) 토폴로지 기반 FCEV(Fuel Cell Electric Vehicle)용 부스트 컨버터 최적 제어 알고리즘을 제안한다. 수소연료전지차의 부하 요구량에 따라 변하는 메인 부스트 스위치의 ZVT 시점을 보조 공진 스위치의 듀티(Duty)를 능동적으로 가변하여 환류 구간을 저감함으로써 98% 이상의 고효율 달성이 가능하다. 본 논문에서 제안한 제어 방식은 70kW급 시작품을 제작하여 실험을 통해 검증하였다.

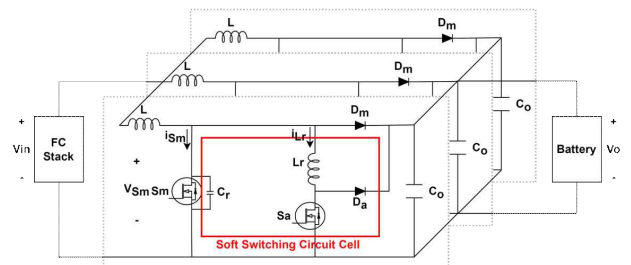
1. 서론

수소연료전지 자동차(Fuel Cell Electric Vehicle, FCEV)는 수소와 공기 중의 산소의 반응으로 발생한 전기 에너지를 사용하는 친환경 차량이다. FCEV의 주 전력원인 연료전지 스택은 전류 리플과 출력 부하에 따른 전압 변동 특성을 가지기 때문에 스택 전압을 일정하게 승압시키고 리플은 저감하여 차량 내 안정적인 전원 공급을 제공할 컨버터가 요구된다. 이러한 컨버터는 차량 내라는 한정적인 공간과 차량 성능을 고려하여 고효율 및 고전력밀도를 달성할 수 있도록 설계되어야 한다.

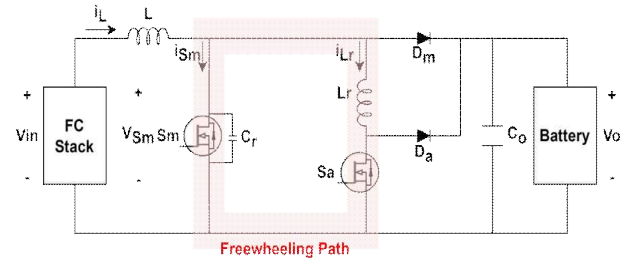
본 논문에서는 대전력 동작에서 리플을 개선하면서 인덕터 부피를 줄이기 위해 인터리브드 부스트 컨버터 구조를 적용한다. 일반적으로 전력밀도를 향상하기 위해 스위칭 주파수를 높이지만, 이는 스위칭 손실도 증가하기 때문에 고효율 동작을 달성하기 어렵다. 따라서 그림 1(a)과 같이 공진을 이용해 영전압 스위칭(Zero Voltage Switching ZVS)을 하는 소프트 스위칭 셀 회로를 포함한 ZVT-PRC(Zero Voltage Transition-Partial Resonant Converter) 토폴로지를 적용하여 컨버터를 구성한다^[1]. 하지만 이러한 구조는 소프트 스위칭 셀의 보조 스위치(S_a) 듀티에 따라 환류 구간의 시간이 정해지면서 손실이 발생한다^[2]. 이에 따라 부스트 컨버터의 메인 스위치(S_m)가 하드 스위칭하지 않으면서 환류 구간의 시간은 최소화하여 부하 구간별 최고의 효율로 동작할 수 있는 제어 방안이 요구된다.

본 논문에서는 ZVT-PRC 기법이 적용된 인터리브드 컨버터의 효율 상승을 위한 보조 스위치 제어 방안을 제시한다. 이는 70kW급 시작품 실험 결과를 바탕으로 제시한 제어 방안의 타당성을 검증한다.

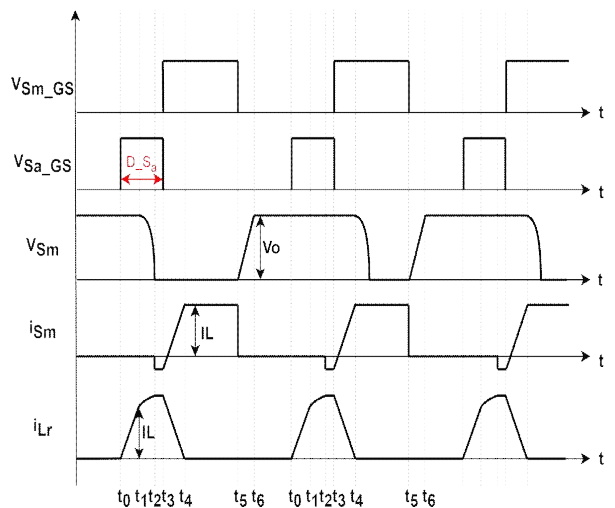
2. ZVT-PRC 기반 인터리브드 컨버터 설계 및 제어



(a) Circuit Configuration



(b) Freewheeling Path of Soft Switching Cell



(c) Operation Waveform of Single Phase

그림 1 제안하는 ZVT-PRC 기반 인터리브드 부스트 컨버터^{[1][2]}
Fig.1 Proposed Interleaved Boost Converter with ZVT-PRC Topology^{[1][2]}

2.1 제안하는 컨버터의 동작 및 제어

그림 1(a)는 본 논문에서 제안하는 ZVT-PRC 토폴로지를 적용한 3상 인터리브드 부스트 컨버터 회로 구성을 보여준다. ZVS를 위한 소프트 스위칭 셀은 공진 인덕터(L_r), 공진 커패시터(C_r), 보조 스위치(S_a) 및 보조 다이오드(D_a)로 구성된다. 그림 1(c)에서 보이듯이 보조 스위치는 메인 부스트 스위치(S_m)가 턴-오프된 상태에서 최대 Drain-Source 전압(V_{Sm})을 유지할 때 턴-온 되어 V_{Sm} 를 영전압으로 감소시킨 뒤 S_m 가 영전압 턴-온되도록 동작한다. 이 때 보조 스위치의 듀티 (D_{S_a})는 공진 전류(i_{Lr})이 입력 전류(I_L)까지 도달하는 시간(t_0-t_1), C_r 과 L_r 이 공진하게 되면서 S_m 의 역병렬 다이오드를 통해 전류가 도통되는 환류 구간(t_1-t_2) 및 스위치들의 온/오프 시간을 고려한 마진(t_2-t_3)로 이루어져 있다. 그림 1(b)와 같은 S_a 의 듀티에 따라 결정되는 환류 구간의 시간(t_1-t_2)은 길이가 증가할수록 L_r 및 스위치들의 도통 손실이 증가하기 때문에 고효율 동작이 어려워지므로 손실을 저감할 수 있는 보조 스위치의 듀티 제어 방안이 요구된다.

본 논문에서 제안하는 방식은 그림 2와 같이 일정 부하 구간별 보조 스위치의 듀티를 가변하는 방식이다. 부하가 급변하는 차량용 컨버터의 경우 실시간으로 듀티를 제어하기 어렵기 때문에 그림 2 파란색 실선과 같이 부하와 무관하게 S_a 의 듀티를 최대값으로 고정하는 방법이 존재한다. 이러한 방식은 메인 스위치의 ZVS를 부하와 상관없이 안정적으로 구현할 수 있지만, 경부하 구간에서 t_0-t_1 의 시간이 짧아지는 만큼 환류 구간의 길이가 길어지기 때문에 그만큼 손실이 증가하게 된다. 따라서, 메인 스위치가 하드 스위칭하지 않는 최저 듀티에서 일정 부하 상승량에 따라서 S_a 의 듀티를 최대값까지 상승하는 방안을 제안한다.

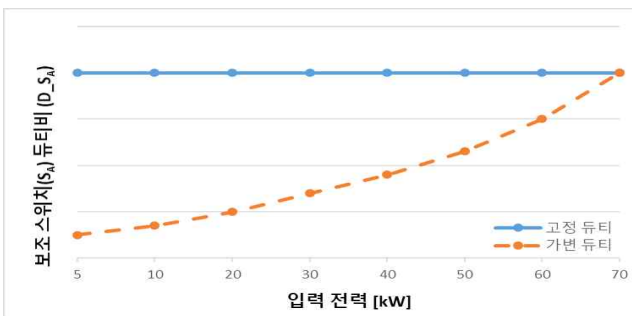


그림 2 부하에 따른 보조 스위치 듀티 제어
Fig. 2 Test-bed of 70kW Prototype

표 1 FCEV용 부스트 컨버터 설계 사양 및 주요 파라미터
Table 1 Design Specification and System Parameters of Boost Converter for FCEV

Parameter	Value	Unit
입력 전압 범위 (V_{in})	340 - 630	V
출력 전압 범위 (V_o)	530 - 830	V
스위칭 주파수 (f_{sw})	150	kHz
메인 인덕터 (L)	30	mH
DC Link 커패시터 (C_o)	200	μ F
공진 인덕터 (L_r)	2	μ H
공진 커패시터 (C_r)	3	nF
최대 출력 (P_{max})	70	kW

2.2 시작품 실험 결과

표 1은 제안하는 회로 설계와 제어 방안을 검증하기 위해 제작된 70kW급 시작품 설계 사양을 나타낸다. 그림 3은 시작품 동작을 확인하기 위한 시험 환경을 보여주며 입력 전압 400V, 출력 전압 660V 조건에서 시험하였다.

2.1절에서 언급한 환류 구간 시간 최소화를 위한 보조 스위치의 듀티비를 가변하는 제어 방안을 적용한 결과는 그림 4와 같다. 경부하 구간 제외 모든 부하 구간에서 S_a 의 듀티비를 가변하는 제어 방식이 일정하게 제어하는 경우에 비해 효율이 개선되는 것을 확인하였다. 특히 경부하 조건에서 약 0.9%의 효율 향상을 보여준다.

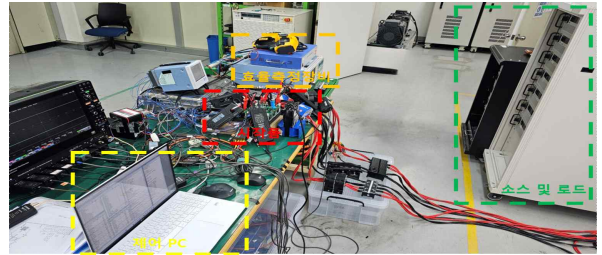


그림 3 70kW급 시작품 실험 전경
Fig. 3 Test-bed of 70kW Prototype

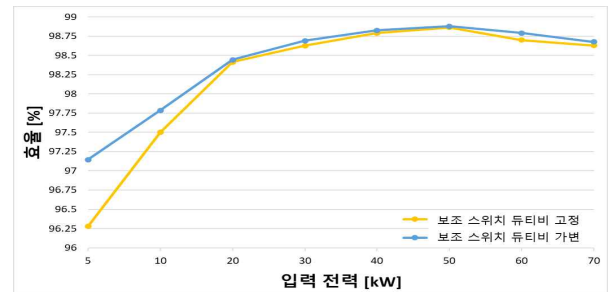


그림 4 제안하는 제어 방식 적용 전후 효율 비교 그래프
Fig. 4 Efficiency Curve of the Prototype Converter before and after applying proposed control method

3. 결론

본 논문에서는 ZVT-PRC 토폴로지를 적용한 인터리브드 부스트 컨버터의 보조 스위치 듀티 가변을 통한 고효율 동작 방안을 제안하였다. FCEV용 부스트 컨버터 설계 사양에 따라 70kW급 시작품을 제작하여 제안하는 컨버터 구조 및 제어 방안의 적용 타당성을 검증하였다.

본 연구는 산업통상자원부(MOTIE)와 산업기술기획평가원(KEIT)의 지원을 받아 수행한 연구 과제임. (No.2024898)

참고 문헌

- [1] E. C. Noh, G. B. Joung, N. S. Choi, Power Electronics: Fourth Edition, Munundang Publishing Company, Inc. pp.501-512, 1997.
- [2] S. H. Kang, J. S. Lee, Y. S. Hwang, M. J. Kwon, E. S. Jang, and B. K. Lee, "Control Method of HDC based on ZVT-PRC Considering Increase of Step-up Ratio and Power loss," Power Electronics Conference, 2021.